

研究

自己励起位相共役波と空間フィルターを用いた ノヴェルティーフィルター

永田 哲生*・橋本 信幸**・小松 進一*

* 早稲田大学理工学部応用物理学科 〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1

** シチズン時計(株)技術研究所 〒359 所沢市下富 840

(1995年4月6日受付, 1995年8月24日受理)

Novelty Filter Using a Spatial Filter and Self-Pumped Phase Conjugate Wave

Tetsuo NAGATA,* Nobuyuki HASHIMOTO** and Shinichi KOMATSU*

* Department of Applied Physics, Waseda University, 3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169

** Technical Laboratory, Citizen Watch Co., Ltd., 840, Shimotomi, Tokorozawa 359

(Received April 6, 1995; Accepted August 24, 1995)

We propose an optical novelty filter using a self-pumped phase conjugate wave from a photorefractive crystal BaTiO₃ and a spatial filter, which block the time-independent parts of an input image. This optical system is simple and it is not necessary to care about reflectivity of the phase conjugate mirror. The spatial filter is also effective to eliminate the unwanted higher order diffraction spots from the liquid crystal display panel for image input. We investigated analytically and experimentally some basic characteristics of the proposed system.

1. はじめに

近年、光情報処理や光計測の分野において注目されている光学素子としてフォトトリフラクティブ(PR)結晶がある。この結晶のPR効果により位相共役波の発生や光増幅などが実現でき、従来の光学素子がない新しい機能をもつ光学素子の開発が可能となった。そのためさまざまな応用が期待され、そのひとつとして光情報処理への応用が考えられる。その中にPR結晶の応答時間が比較的遅い(数ms～数s)ことを利用した実時間動画像検出がある。これは入力画像からの静止(背景)部分以外の時間変化する新奇な部分のみを検出するものである。古くはレーダーの画面から過去の像を除去し、新しい像のみを強調する手段としてエレクトロニクスの分野で実現されていた。これを光学的処理することにより、電子処理と比べて2次元の動画像を単純な構成で実時間並列処理できる利点がある。これまでにFeinbergらが

提案した位相共役波を用いたマイケルソン干渉計のノベルティーフィルター¹⁻³⁾や、二光波混合を用いたノベルティーフィルターも提案されている⁴⁻⁶⁾。しかし干渉計を用いる光学系では2本の位相共役波の強度分布が互いに等しいというかなり厳しい条件が必要である。また一般にノベルティーフィルターに画像を入力するための位相変調器として用いられる液晶パネルから生じる回折光の除去が問題となっていた。

本研究では1本の自己励起位相共役波と空間フィルターを用いることで、簡易なノベルティーフィルターを構築し、その検討と実験結果を報告する⁷⁾。

2. 1本の自己励起位相共役波と空間フィルターを用いたノベルティーフィルター

今回用いた光学系をFig. 1に示す。スペイシャルフィルター(SF)を通した光をレンズL₁でコリメートし平面波をつくる。この平面波がビームスプリッタ

(BS) を通過した後、位相変調器である液晶パネルに照射され、さらにレンズ L_2 で BaTiO_3 の結晶に集光されて自己励起位相共役波を発生させる。この位相共役波は入射時と逆方向に伝搬し再度液晶パネルを通過する。このとき液晶パネルにどんな位相情報を与えられても位相共役波の特性により位相歪みが補正され BS から反射した位相共役波は平面波として取り出されるが、入力画像に変化が起こった瞬間（位相変化が起こった瞬間）結晶の応答時間が遅いため、新しい位相共役波が発生するまでの間、前の位相情報をもった位相共役波が発生し続ける。よって新しい画像と古い画像との差が位相分布として現れる。その位相共役波をレンズ L_3 で集光し、そのフーリエ面上に空間フィルターをかけ直流成分だけ

をカットし、時間変化する高周波数成分だけをレンズ L_4 の通過後、CCD (charge coupled device) カメラで検出する。

この光学系のはたらきを式を追って説明する。コリメーターによりつくられた平面波を式(1)で表す。簡単のため、1次元で考え、振幅分布を一定と仮定する。

$$E = A \exp\{i(\omega t - kz)\} \quad (1)$$

その位相共役波は式(2)のようになる。

$$E^* = A^* \exp\{i(\omega t + kz)\} \quad (2)$$

もし入力画像の $-a$ から a までの範囲で一定量 ϕ の位相変化が起こったと仮定すると、変化が起こった瞬間 BS から取り出された位相共役波は式(3)のような位相分布をもつ。

$$E' = A^* \exp\{i(\omega t + kz + \phi(x))\} \quad \phi(x) = \begin{cases} 0 & |x| \geq a \\ \phi & |x| \leq a \end{cases} \quad (3)$$

式(3)を空間座標 x についてフーリエ変換すると式(4)のようになる。

$$F\{E'\} = A^* \exp\{i(\omega t + kz)\} [2a \operatorname{sinc}(2\pi f_x a) \times \{\exp(i\phi) - 1\} + \delta(f_x)] \quad (4)$$

これにフーリエ面上で直流成分をカットする空間フィルターをかける。実際には空間フィルターが有限であることを考慮して $(-f_c, f_c)$ の空間周波数成分を除くもの

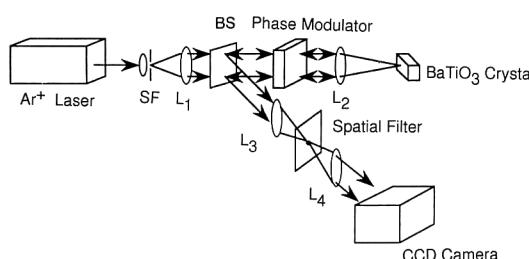


Fig. 1 Optical novelty system using a spatial filter and self-pumped phase conjugate wave.

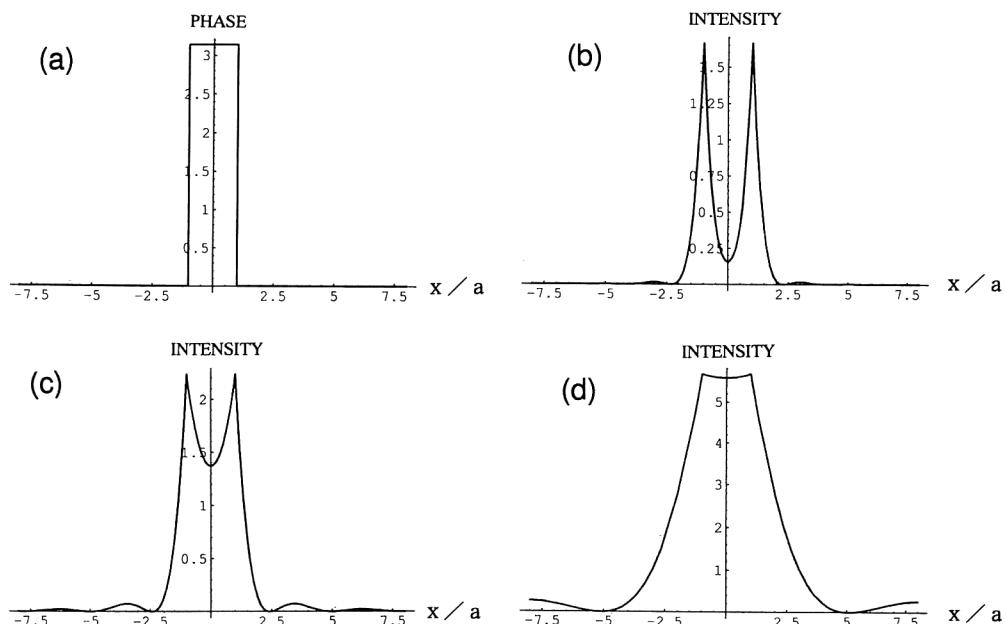


Fig. 2 Phase distribution of input image and intensity distribution of output images. (a) Phase distribution when a change occurred, (b) intensity distribution of output image when the radius of mask is $|f_c|=1/2a$, (c) $|f_c|=1/3a$, and (d) $|f_c|=1/8a$.

とする。式(4)の右辺のうち空間周波数 f_x に依存する部分のみに着目して、これに幅 $2f_c$ の空間フィルターをかけて直流成分を除いたものは式(5)の $G(f_x)$ で与えられる。

$$G(f_x) = \begin{cases} \text{sinc}(2\pi f_x a) & |f_x| \geq f_c \\ 0 & |f_x| \leq f_c \end{cases} \quad (5)$$

ここで特別な場合として $f_c=1/(2a)$ のときを考える。式(5)の $G(f_x)$ を f_x について逆フーリエ変換した $g(x)$ は式(6)の $g(x)$ のように表せる。

$$g(x) = \frac{1}{a} \left[\pi - \text{Si}\left[\frac{\pi}{a}|a-x|\right] - \text{Si}\left[\frac{\pi}{a}|a+x|\right] \right] \quad (6)$$

ただし

$$\text{Si}[z] = \int_0^z \frac{\sin(t)}{t} dt \quad (7)$$

よって出力光の振幅分布は式(8)のようになる。

$$E'' = C' \exp\{i(\omega t + kz)\} g(x) \{\exp(i\phi) - 1\} \quad (C' = \text{const.}) \quad (8)$$

また強度分布は式(9)のようになる。

$$I(x) = C'' |g(x)|^2 (1 - \cos \phi) \quad (C'' = \text{const.}) \quad (9)$$

これをグラフに示すと Fig. 2 のようになる。Fig. 2(a)が与えられた位相分布で式(3)を表す。この位相分布が与えられた瞬間に得られる出力強度分布 $|g(x)|^2$ が Fig. 2(b)で与えられる。出力強度分布は位相変化に正確には一致しないことがわかる。空間フィルターであるマスクの幅 $2f_c$ により出力の強度分布が変化する。マスクの幅 $2f_c$ を、Fig. 2(b)の $f_c=1/(2a)$ に対して、 $f_c=1/(3a)$ と $f_c=1/(8a)$ とした結果を Fig. 2(c) と Fig. 2(d) に示した。マスクの幅の減少とともにエッジのリンクングが消えていく。また位相変化が π に近いほど出力光の強度が強くなることが式(9)よりわかる。

3. シミュレーション

ここでは実際の空間フィルターをどのような振幅透過率にすればよいかコンピューターを用いて検討する。前節2の計算では簡単のため、直流成分の振幅透過率を0、それ以外の振幅透過率を1で計算した。本節では空間フィルターを、(1) 円形のマスクにした場合、(2) 位相共役波の定常状態のパワースペクトル分布を空間フィルターの透過率分布にした場合の2通りを考える。シミュレーションはすべて 256×256 で行う。入力像は Fig. 3 に示すようにアルファベットの大文字の E を使用し、振幅分布は一定とした。シミュレーションは式(10)に示すように入力像 $f(x, y)$ をフーリエ変換し、その後フィルター関数 $T(f_x, f_y)$ を掛け、逆フーリエ変換を行う。

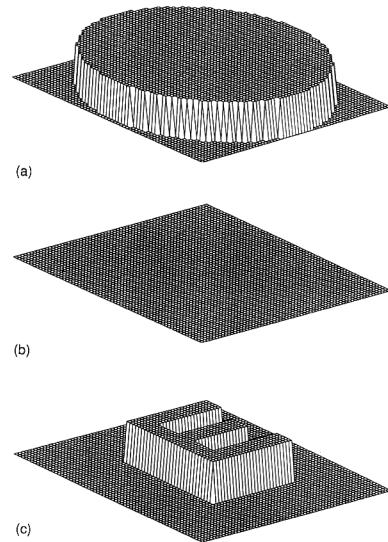


Fig. 3 Three dimensional input images. (a) Intensity of input image, (b) phase at steady state, and (c) phase when a change occurred.

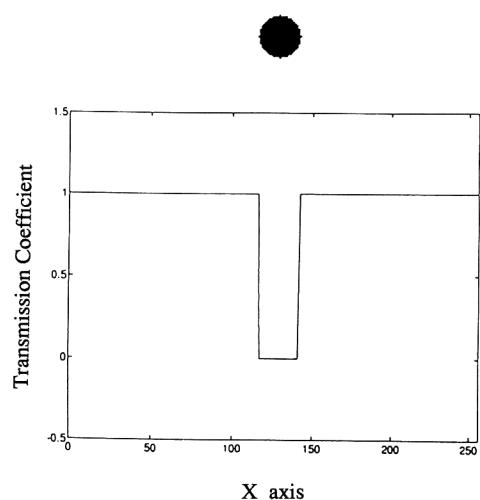


Fig. 4 Amplitude transmittance of filter 1.

Table 1 Diameters of filter 1.

Filter	Diameter
A	2.148
B	1.757
C	1.367
D	0.975
E	0.586
F	0.195

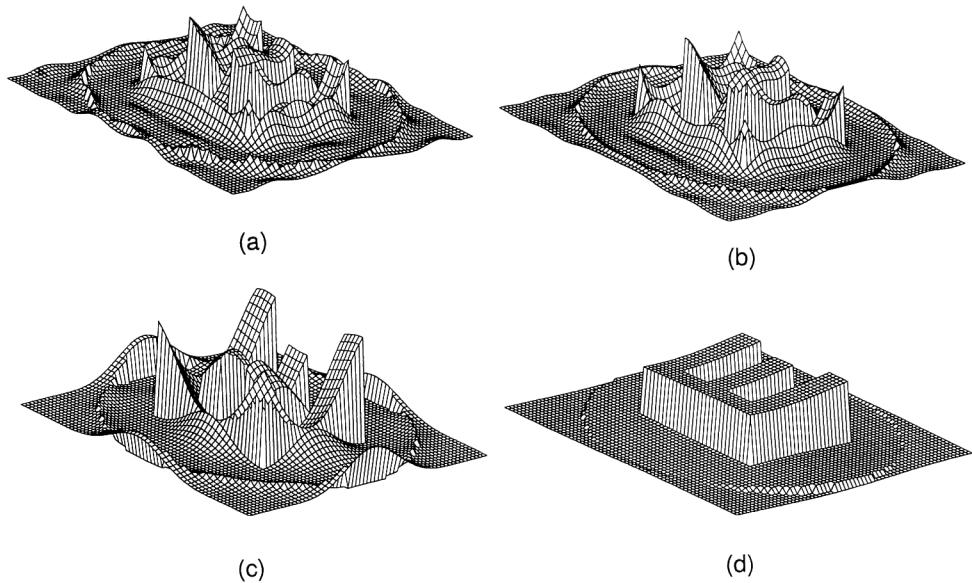


Fig. 5 Output images. (a) Output image obtained with filter B, (b) with filter C, (c) with filter D, and (d) with filter E.

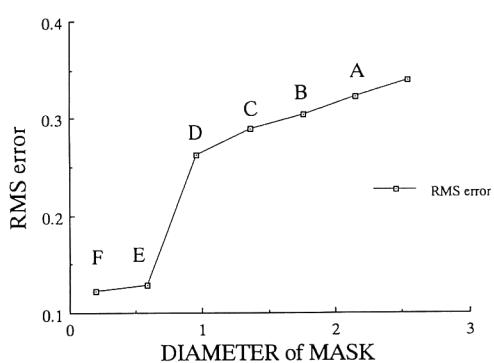


Fig. 6 RMS error of output images with filter 1.

$O(x, y)$ は最終的に CCD カメラで検出される出力像の強度分布である。

$$O(x, y) = |FT^{-1}[FT[f(x, y)] \times T(f_x, f_y)]|^2 \quad (10)$$

3.1 空間フィルターを円形のマスクにした場合

まず空間フィルターを円形にしたときのシミュレーションを行う。入力像の振幅分布は Fig. 3(a) を、定常状態のときの位相共役波の位相分布は Fig. 3(b) を、E の文字を入力した瞬間に得られる位相共役波の位相分布は Fig. 3(c) を用いた。フィルターの直径をパラメーターにして、このときの出力像の分布を考える。Fig. 4 にフィルターの透過率分布を示す。またフィルター A, B, C, D, E, F の直径を Table 1 に示す。ただしこれは位

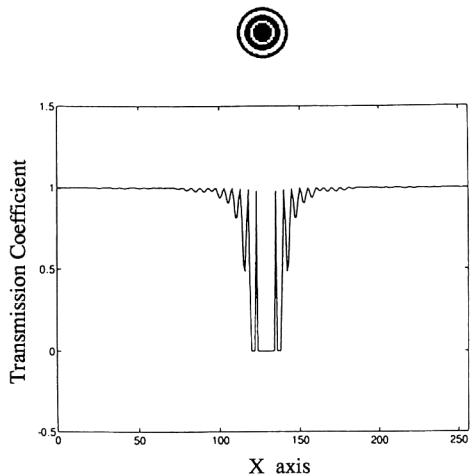


Fig. 7 Amplitude transmittance of filter 2.

Table 2 Exposure time filter 2.

Filter	Exposure time
A	0.5886
B	0.5000
C	0.4346
D	0.4037
E	0.3705
F	0.3333
G	0.3029
H	0.2876

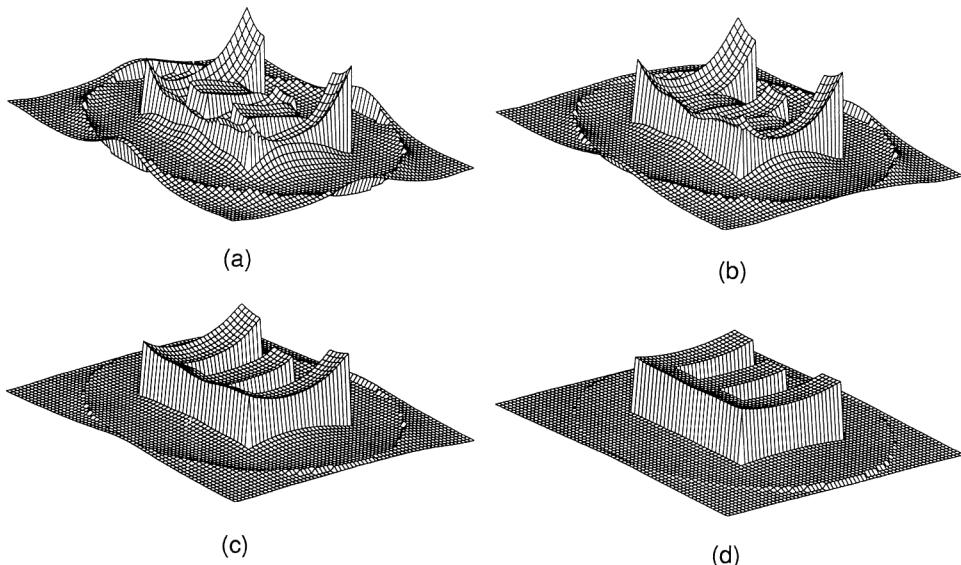


Fig. 8 Output images. (a) Output image obtained with filter B, (b) with filter D, (c) with filter F, and (d) with filter H.

相共役波の定常状態のときのエアーディスクの第一暗環の直径で正規化した値である。

Fig. 5 に入力像を変えたときの出力像を示す。このときの位相変化量は π とする。これらの結果を RMS エラーを用いてグラフにしたもののが **Fig. 6** になる。RMS エラーの定義は以下のとおりである。

$$\text{RMS エラー} = \sqrt{(F_i - G_i)^2} \quad (11)$$

ただし、 $F_i = f_i / f_{\max}$, $G_i = g_i / g_{\max}$, f_i : 入力画像, g_i : 出力画像, f_{\max} : 入力画像の最大値, g_{\max} : 出力画像の最大値。

3.2 定常状態の位相共役波のパワースペクトル分布を透過率とした場合

次に定常状態の位相共役波のパワースペクトル分布を空間フィルターの透過率分布にした場合のシミュレーションを行う。空間フィルターを **Fig. 7** に、その透過率分布を **Table 2** に示す。この位相共役波のパワースペクトル分布にある値以上を一定とするしきい値処理を施すことで、相対的な空間フィルターの透過率分布を決め、パラメーターとして露光時間を用いた。

3.1 項と同様に入力像を与え、その結果を示す。変化が起こった瞬間の出力強度分布を **Fig. 8** に示す。またこれらの結果を RMS エラーを用いてグラフにしたもののが **Fig. 9** になる。このときの位相変化量も π とする。

3.3 シミュレーションの結果

まず定常状態のときに理想的には出力強度がゼロでな

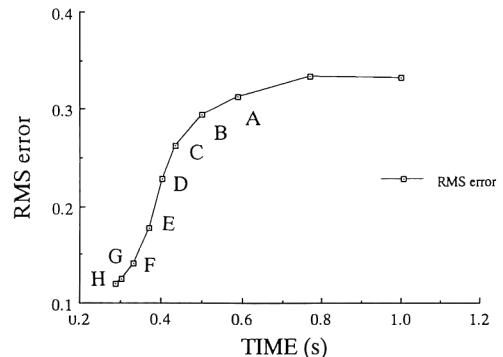


Fig. 9 RMS error of output images with filter 2.

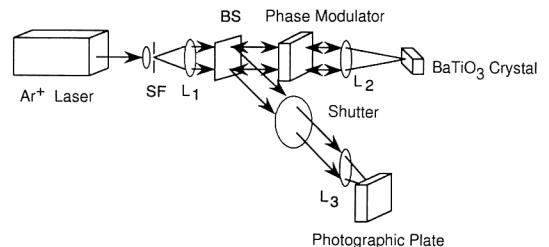


Fig. 10 Experimental setup to make filters.

ければならないので、これらの結果より円形のフィルターを用いたときにはフィルター直径がエアーディスクの第一暗環の直径よりも大きくなれば光を十分に遮光することができないが、そのときの変化が起こった瞬間

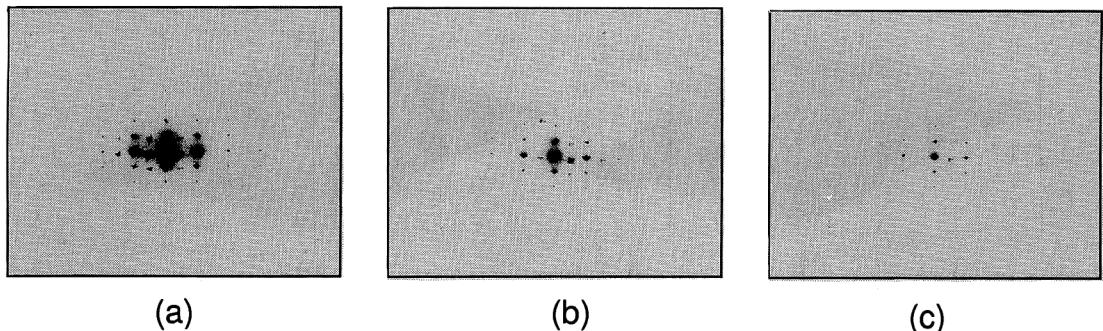


Fig. 11 Filters used in our experiment. (a) Exposure time is 1/2s, (b) 1/4s, and (c) 1/8s.

に得られる出力像はかなりみえづらくなっている。RMS エラーの値をみてもエアリーディスクの第一暗環の直径よりも大きいフィルターを使うとかなり増加した。それに比べて位相共役波の定常状態のときのパワースペクトル分布を透過率分布にした空間フィルターを用いると定常状態のときの余分な光を円形のフィルターと比べて十分にカットでき、また変化が起こった瞬間の出力像の RMS エラーについても多少の減少がみられた。よって実験ではこのタイプのフィルターを作製し、用いることとする。また位相変化量がゼロに近いほど出力像はみえづらく、 π に近づくほどはっきりとみえ、RMS エラーも減少することを他のシミュレーションにより確認した。よって位相変調器である液晶パネルは π 前後の位相変調量があることが望ましい。

4. 実験および結果

4.1 空間フィルターの作製

空間フィルターは位相共役波の定常状態のときのパワースペクトル分布をフィルターの透過率分布にしたもの用いる。そのため実際の動画像を検出するときの光学系 Fig. 1 の空間フィルターの位置にホログラム用写真乾板を、その前にシャッターを置き (Fig. 10)，露光時間を調節し位相共役波を露光した。このときの位相共役波の平均強度は約 $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ であった。この光学系を用いて数枚の露光時間の異なる空間フィルターを作製した。その空間フィルターを Fig. 11 に示す。露光時間は Fig. 11(a) が 1/2 秒、Fig. 11(b) が 1/4 秒、Fig. 11(c) が 1/8 秒である。

4.2 実時間動画像検出

4.1 項で作成した空間フィルターを用い、Fig. 1 の光学系で実験を行った。アルゴンイオンレーザー (514.5 nm) のビームを対物レンズ 20 倍、ピンホール $10 \mu\text{m}$

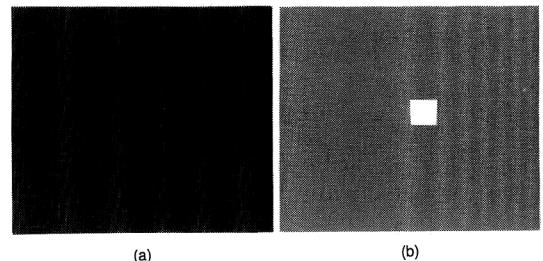


Fig. 12 Input images.

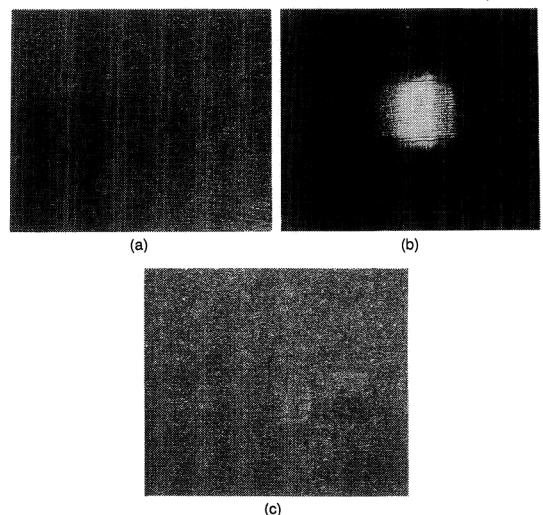


Fig. 13 Experimental results. (a) Output image before a change occurs, (b) output image when a change occurs, and (c) output image at steady state.

のスペイシャルフィルターに通す。レンズ L_1 , L_2 は焦点距離 10 cm 、レンズ L_3 , L_4 は焦点距離 25 cm を用いた。入力像を Fig. 12 に示す。今回の実験では入力画像を 2 枚用意し、それをパーソナルコンピューターから画

像処理ボードを通し、液晶パネルに表示させる。今回使用した液晶パネルはMIM Active-Matrix型で、表示領域は21.1 mm×15.9 mm、画素数は640×230、画素のピッチは33×69 μmのものである。実験の手順として最初、Fig. 12(a)の何も情報がない画像を液晶パネルに表示させ、その後Fig. 12(b)の画像を表示させた瞬間の出力画像を検出することにする。Fig. 12(b)の画像は液晶パネルの中央の部分に50×50ピクセルの正方形を含んでいる。

このときの実験結果をFig. 13に示す。Fig. 13(a)は最初の変化を与えていないときの出力像、Fig. 13(b)は入力像を切り替えた瞬間の出力像、Fig. 13(c)はその後しばらくしてから定常状態に戻ったときの出力像である。この実験結果で使用した空間フィルターは1/8秒で露光させたものである。これらより変化の起った場所を実時間で検出することができ、その後出力像が消えていくのがわかる。1/4秒以上露光した空間フィルターを使用した実験結果はあまり良好な出力像が得られなかつたが、シミュレーションと比較してみても、この光学系を用いることによりかなり微小なマスクの空間フィルターを簡単に作製することができた。よって本実験で提案した光学系を用いれば、動画像の実時間検出にも応用できる。

5. まとめ

本研究において1本の自己励起位相共役波と空間フィ

ルターを用いた光学系で、実時間動画像検出が行えることを確認した。この光学系はマイケルソン干渉計を用いた光学系より簡易であると同時に、2本の位相共役波の強度分布を互いに等しくするために位相共役鏡の反射率を調節する必要がないなどの利点がある。また空間フィルターは位相共役波の定常状態のときのパワースペクトル分布をフィルターの透過率分布にしたもの用いた。この空間フィルターは光学系にホログラム用写真乾板を置き、位相共役波を露光するだけで簡単に作製できる。またそうすることによって液晶パネルからの回折光もかなり除去でき、今回提案した光学系が本研究に有効であることがわかった。

文 献

- 1) D. Z. Anderson and J. Feinberg : "Optical novelty filters," IEEE J. Quantum Electron., **QE-25** (1989) 635-647.
- 2) D. Z. Anderson and M. C. Erie : "Resonator memories and optical novelty filters," Opt. Eng., **26** (1987) 434-444.
- 3) D. Z. Anderson, D. M. Lininger and J. Feinberg : "Optical tracking novelty filter," Opt. Lett., **12** (1987) 123-125.
- 4) M. Cronin-Golomb, A. M. Biernacki, C. Lin and H. Kong : "Photorefractive time differentiation of coherent optical image," Opt. Lett., **12** (1987) 1029-1031.
- 5) J. E. Ford, Y. Fainman and S. H. Lee : "Time-integrating interferometry using photorefractive fanout," Opt. Lett., **13** (1988) 856-858.
- 6) N. S. Kwong, Y. Tomita and A. Yariv : "Optical tracking filters using transient energy coupling," J. Opt. Soc. Am. B, **5** (1988) 1788-1791.
- 7) 永田哲生、橋本信幸、小松進一：“自己励起位相共役波と空間フィルターを用いた動画像検出”，光学連合シンポジウム浜松'94 講演予稿集 (1994) pp. 253-254.